

УДК 621.791.92:621.793.09

**А. В. Макаров<sup>1, 2\*</sup>, Н. Н. Соболева<sup>2</sup>, Ю. С. Коробов<sup>1</sup>,  
А. А. Вопнерук<sup>3</sup>, А. Б. Котельников<sup>3</sup>, И. Ю. Малыгина<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>2</sup>Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>3</sup>Научно-производственное предприятие «Машпром», г. Екатеринбург

\*av-mak@yandex.ru

## ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ В МЕТАЛЛУРГИИ

Установлена превалирующая роль упрочняющих фаз в сопротивлении NiCrBSi-покрытий абразивному изнашиванию и наибольшая эффективность применения композиционных покрытий. Обоснован эффект формирования термически стабильных структур в результате высокотемпературного отжига. Предложенные подходы использованы в технологии производства стенок кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок.

*Ключевые слова:* покрытия на основе никеля, лазерная наплавка, отжиг, износостойкость, стенки кристаллизаторов

**A. V. Makarov, N. N. Soboleva, Yu. S. Korobov, A. A. Vopneruk,  
A. B. Kotelnikov, I. Yu. Malygina**

## NICKEL BASED WEAR-RESISTANT COATING FOR HIGH-TEMPERATURE APPLICATIONS IN METALLURGY

The predominant role of strengthening phases in the abrasive wear resistance of NiCrBSi coatings and the highest efficiency of composite coatings application is established. The formation of thermally stable structures after high-temperature annealing is substantiated. The proposed approaches are used for the production of mold walls of continuous casting machines.

*Key words:* Ni-based coatings, laser cladding, annealing, wear resistance, mold walls.

**А**ктуальной задачей является совершенствование и поиск новых путей повышения износостойкости и термической устойчивости покрытий на никелевой основе, которые находят широкое применение при производстве и восстановлении деталей металлургического оборудования. Представлен обзор работ, направленных на решение указанной задачи.

Эффективность повышения абразивной износостойкости за счет формирования NiCrBSi-покрытий определяется главным образом не средней твердостью покрытий, а твердостью упрочняющих фаз (карбидов, боридов, карбоборидов) и механизмами изнашивания (микрорезание или царапание), развивающимися в зависимости от соотношения твердостей упрочняющих фаз и абразивных частиц [1]. Установлены важные преимущества применения композиционных покрытий с TiC [1].

Научно обоснован эффект формирования в NiCrBSi лазерном покрытии термически стабильных износостойких структур каркасного типа с крупными карбидами и боридами хрома в результате высокотемпературного (1000–1050 °C) отжига [2–4]. Стабилизирующий отжиг обеспечивает рост износостойкости покрытия в условиях сильного фрикционного нагрева при высокоскоростном (3,1–9,3 м/с) трении [5].

Предложенные научные подходы использованы в новой высокоэффективной технологии производства стенок кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок с износостойкими покрытиями на Ni-основе [6]. Испытания на металлургических комбинатах России (НТМЗ, НЛМК, ММК, Северсталь, ВМЗ, Мечел, Уральская сталь) показали рост ресурса стенок в 3...12 раз относительно зарубежных аналогов.

*Работа выполнена в рамках государственных заданий ИФМ УрО РАН по темам «Структура» (№ АААА-А18–118020190116–6), «Лазер» и ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18–118020790147–4.*

## Литература

1. Makarov A. V., Soboleva N. N., Malygina I. Yu. Role of the strengthening phases in abrasive wear resistance of laser-clad NiCrBSi coatings // *Journal of Friction and Wear*. 2017. V. 38, Is. 4. P. 272–278.
2. Способ получения теплостойкого покрытия: пат. 2492980 Рос. Федерация: МПКВ 23 К 26/34, В 23 К 26/14 / Макаров А. В., Соболева Н. Н., Малыгина И. Ю., Осинцева А. Л.; заявл. 13.04.2012; опубл. 20.09.2013. Бюл. № 26. 6 с.
3. Формирование износостойкого хромоникелевого покрытия с особо высоким уровнем теплостойкости комбинированной лазерно-термической обработкой / А. В. Макаров [и др.] // *МиТОМ*. 2015. № 3. С. 39–46.
4. Improving the properties of a rapidly crystallized NiCrBSi laser clad coating with high-temperature processing / A. V. Makarov [et al.] // *Journal of Crystal Growth*. 2019. V. 525. 125200.
5. Wear-resistant nickel-based laser clad coatings for high-temperature applications / A. V. Makarov [et al.] // *Letters on Materials*. 2019. V. 9. Is. 4. P. 470–474.
6. Новые материалы и технологии существенного повышения износостойкости рабочей поверхности металлургического оборудования / А. Б. Котельников [и др.] // *Тяжелое машиностроение*. 2018. № 9. С. 14–20.